

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ
TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA ENERGETIKY

Studie využití odpadního tepla z bioplynové stanice v obci Želatovice

Study of Waste Energy Utilization from Biogas Station at Municipality Želatovice

Vedoucí bakalářské práce:

Student:

Ing Jiří NEZHODA, Ph.D

Mgr. Lucie Vybíralová

Ostrava 2011

Zadání bakalářské práce

Student: **Mgr. Lucie Vybíralová**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3904R016 Technika tvorby a ochrany životního prostředí
Téma: Studie využití odpadního tepla z bioplynové stanice v obci Želatovice
Study of Waste Energy Utilization from Biogas Station at Municipality
Želatovice

Zásady pro vypracování:

Posuďte možnost využití odpadního tepla z provozu bioplynové stanice v Želatovicích.

- Stanovte množství a parametry využitelného odpadního tepla.

- Stanovte potřebu tepla využitelného v areálu bývalého JZD.

- Navrhněte alternativní možnosti využití odpadního tepla.

Jednotlivé návrhy ekonomicky a environmentálně porovnejte.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] DIDUŠKOVÁ, M., VOTÁPEK, M. Jak investovat do úspor a šetřit vlastní kapitál. Energy Performance Contracting. SEVEN, Praha, 1995.
- [2] Kol. autorů: Audit energetického hospodářství budov. Skripta pro kurz energetických auditorů. ČEZ, a.s., RAEN, s.r.o., Praha, 1997.
- [3] Kol. autorů. Energetický audit. Metodika auditu. ČEA, Praha, 1996.
- [4] Kol. autorů. Metodika energetického auditu. ČEA, Praha, 1996.
- [5] Vyhláška č. 213/2001, kterou se vydávají podrobnosti náležitostí energetických auditů.
- [6] Zákon č. 406/2000 Sb. o hospodaření s energií.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

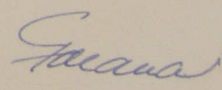
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Nezhoda, Ph.D.**

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst.3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst.4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....
Plné jméno studenta

Adresa trvalého pobytu studenta:

Lucie Vybíralová
Lazníčky 10
Lazníčky
751 25

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VYBÍRALOVÁ, L. Studie využití odpadního tepla z bioplynové stanice v obci Želatovice. Ostrava: katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011, 32 s. Bakalářská práce, vedoucí Nezhoda, J.

Bakalářská práce se zabývá návrhem využití odpadního tepla z bioplynové stanice. Podle množství vyrobeného tepla je navrženo využití tepla pro sušení zemědělských plodin nebo digestátu, vytápění skleníků a pro použití v Rankinově organickém cyklu. Je také navrženo využití spalin pro zvýšení koncentrace CO₂ a urychlení růstu plodin. Ekonomické vyčíslení je uvedeno v poslední kapitole.

ANNOTATION OF THESIS

VYBÍRALOVÁ, L. Study of Waste Energy Utilization from Biogas Station at Municipality Želatovice. Ostrava: Department of Energy, Faculty of Mechanical Engineering VŠB-Technical University of Ostrava, 2011, 32 p. Thesis, head Nezhoda, J.

Thesis deal with proposal of waste energy utilization from biogas station. Base on amount of waste heat energy are proposed drying of farm crop or digestate, heating of glasshouse and use in Rankin organic cycle. Use of exhaust gas for increasing of concentration of CO₂ and increasing of farm crop growing is proposed too. Spending on designed arrangement are expres in numbers at last chapter.

Obsah

Úvod	9
1. Kogenerace	10
1.1. Výhody kogenerace	10
1.2. Kogenerace pomocí plynových spalovacích motorů	11
1.3. Jak pracuje kogenerační jednotka	12
1.4. Výroba tepelné a elektrické energie	13
1.5. Využití CO ₂ ze spalin	13
1.6. Bioplynová stanice	14
1.6.1. Standardní řešení bioplynových stanic	14
1.6.2. Bioplynová stanice s vysokým elektrickým výkonem	15
1.7. Další možnosti využití kogeneračních jednotek na bioplyn	16
2. Stanovení množství a parametrů využitelného odpadního tepla v bioplynové stanici v Želatovicích	17
2.1. Potřeba tepla pro provoz BPS	18
2.2. Spotřeba tepla na vytápění a ohřev vody v přilehlých budovách	19
2.3. Energetická bilance a technické ukazatele zdroje energie	19
3. Možnosti využití odpadního tepla	22
3.1. Sušení odpadním teplem z bioplynové stanice	22
3.1.1. Výpočet sušení digestátu pro použití u bioplynové stanice v Želatovicích	23
3.1.2. Alternativní využití sušení	25
3.2. Využití CO ₂ ze spalin pro urychlení růstu rostlin	25
3.2.1. Stanovení množství CO ₂ ve spalinách	26
3.2.2. Návrh skleníku pro pěstování rostlin	28
3.2.3. Množství spalin pro dosažení ideální koncentrace CO ₂	29
3.2.4. Vytápění skleníku	30
3.2.5. Bezpečnostní opatření ve skleníku	31
3.3. Organický Rankinův cyklus	31
4. Ekonomické a environmentální porovnání	34
Závěr	35
Použitá literatura	36

Seznam použitých označení a symbolů:

Značka	Veličina	Rozměr
c	mněrná tepelná kapacita vlhkých spalin	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
c_{CO_2}	koncentrace CO_2	%
k	součinitel prostupu tepla	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
k_{PC}	součinitel prostupu tepla polykarbonátu	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
l	délka skleníku	m
m_1	množství vlhkého digestátu	$\text{t} \cdot \text{rok}^{-1}$
m_2	množství suchého digestátu	$\text{t} \cdot \text{rok}^{-1}$
n	přebytek vzduchu pro spalování	-
o	měrný odsušek	%
o_1	měrný odsušek vztažený na jednotkové množství vlhkého materiálu	%
o_2	měrný odsušek vztažený na jednotkové množství usušeného materiálu	%
Q_1	množství tepla pro vysušení 1kg vlhkého materiálu	$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Q_2	množství tepla pro získání 1kg suchého materiálu	$\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
Q_C	roční celková výroba tepla	$\text{MJ} \cdot \text{rok}^{-1}$
Q_{SC}	celková tepelná ztráta skleníku	kW
$Q_{\text{S,E}}$	množství tepla potřebného pro vytopení skleníku	W
$Q_{\text{S,O}}$	množství tepla získaného ochlazením spalin na 27°C	$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$
Q_{SPC}	tepelná ztráta 1m^2 polykarbonátu	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$
$Q_{\text{SP},27}$	množství tepla přivedeného do skleníku spalinami	$\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$
Q_V	množství tepla využitelného pro sušení	$\text{MJ} \cdot \text{rok}^{-1}$
s	podíl sušiny	%
s_1	počáteční podíl sušiny	%
s_2	konečný podíl sušiny	%
S_S	plocha skleníku	m^2
v	výška skleníku	m
V_{CO_2}	množství CO_2 ve spalinách	m^3_{N}
$V_{\text{H}_2\text{O}}$	množství vody ve vlhkých spalinách	m^3_{N}
V_{N_2}	množství N_2 ve spalinách	m^3_{N}
$V_{\text{O}_2,t}$	teoretické množství kyslíku pro spalování	m^3_{N}
V_S	objem skleníku	m^3

V_{SC}	objem spalín produkovaný bioplynovou stanicí	$\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{s}^{-1}$
V_{SO_2}	množství SO_2 ve spalínách	m^3_{N}
$V_{SP,IDEAL}$	ideální množství spalín pro dosažení dané koncentrace CO_2	m^3_{N}
$V_{SP,t}^S$	teoretické množství suchých spalín	m^3_{N}
$V_{SP,SK}^S$	skutečné množství suchých spalín	m^3_{N}
$V_{SP,SK}^V$	skutečné množství vlhkých spalín	m^3_{N}
$V_{VZ,SK}^S$	skutečné množství suchého vzduchu pro spalování	m^3_{N}
$V_{VZ,t}^S$	teoretické množství suchého vzduchu pro spalování	m^3_{N}
\check{s}	šířka skleníku	m
t_{IDEAL}	ideální teplota ve skleníku	$^{\circ}\text{C}$
t_P	doba plnění skleníku spalínami	s
t_1	teplota uvnitř skleníku	$^{\circ}\text{C}$
t_2	venkovní výpočtová teplota	$^{\circ}\text{C}$
w	podíl vlhkosti v materiálu	%
w_0	podíl vlhkosti vysušený v sušičce	%
w_1	počáteční podíl vlhkosti v materiálu	%
w_2	konečný podíl vlhkosti v materiálu	%
ρ	hustota vlhkých spalín	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
v	součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti vzduchu	-

zkratky:

BPS	bioplynová stanice
Cca	přibližně
ORC	organický Rankinův cyklus
PC	polykarbonát
Obr.	obrázek
Tab.	Tabulka

Úvod

Pro bakalářskou práci jsem si vybrala malou bioplynovou stanici, která se nachází v areálu zemědělské společnosti v přímé blízkosti zdrojů substrátů – produktů zemědělské činnosti a chlévské mrvy. Objekt se nachází 5km od Přerova, v Olomouckém kraji.

V této bioplynové stanici jsou zpracovány cíleně pěstované energetické plodiny a odpady z živočišné výroby, to vše z vlastních zdrojů v celkovém množství přibližně 36 370 tun za rok. Pro společnou výrobu elektřiny a tepla z bioplynu byla zvolena kogenerační jednotka o elektrickém výkonu 999 kW a tepelném výkonu 1015 kW. Vyrobená elektrická energie je prodávána, vyrobené teplo je z více než 70 % mařeno v nouzovém chladiči.

Cílem této práce je navržení různých možností využití tohoto tepla a také environmentální a ekonomické zhodnocení jednotlivých návrhů. Jednotlivé návrhy se budou opírat o skutečnost, že společnost AGRAS Želatovice a.s., která je majitelem bioplynové stanice, vlastní přiléhající komplex zemědělských budov, pozemky a lesy.

Tři základní možnosti využití odpadního tepla se budou zabývat sušením digestátu, pěstováním zemědělských plodin ve vyhřívaných sklenících při optimální koncentraci CO₂ a výrobou elektrické energie pomocí Organického Rankinova cyklu (ORC).

1. Kogenerace

Kogenerace je kombinované využití elektrické energie a tepla. Umožňuje zvýšení účinnosti využití energie paliv. Běžně se při spalování uhlovodíkových paliv, nebo využíváním jiných primárních zdrojů tepla v energetice využije pro vlastní mechanickou práci nebo pro výrobu elektřiny asi 30÷35% energie obsažené v palivu. Vzniká velké množství nízkopotenciálního tepla, které u běžných motorů z největší části (cca 50% energetického obsahu paliva) odchází v podobě horkých výfukových plynů a je zde také další ztrátové teplo, které je nutno odvádět z hlediska zachování funkčnosti motoru chladicí soustavou. Toto teplo představuje tepelné ztráty procesu výroby a přeměny energie (u elektráren je to např. komínová ztráta). Vzhledem k fyzikálním omezením (Carnotův cyklus) není možné toto teplo využít k výrobě mechanické práce nebo elektřiny. U automobilů uniká bez jakéhokoliv užitku do okolí, u velkých tepelných elektráren je vypouštěno chladicími věžemi.

Při kogeneračním procesu je odpadní teplo výhodně využíváno k ohřevu teplé vody, vytápění a podobným účelům. Současně je tedy využita energie pro výrobu elektřiny a ztrátové teplo, které je k dispozici k dalšímu použití. Lze tak dosáhnout přibližně 80% tepelné účinnosti vztahované na energetický obsah výhřevnosti paliva.

1.1. Výhody kogenerace

- **Úspora paliva** - použití kogeneračního způsobu výroby tepla a elektrické energie představuje asi 40% úsporu paliva. Převáděno na finance to znamená, že za stejné množství energie zaplatí uživatel pouze 60% finančních prostředků.
- **Úspora nákladů na nákup energie** - ze stejného množství paliva lze získat přibližně dvojnásobné množství energie, z níž část lze prodávat a tím opět snižovat vlastní náklady.
- **Minimalizace nákladů na rozvod energie** - teplo i elektrická energie vznikají v místě své spotřeby, čímž odpadají náklady na rozvod energie a významně se sníží ztráty způsobené vedením. Teplo vznikající v kogenerační jednotce lze využít k vytápění budov, přípravě teplé užitkové vody nebo k přípravě technologického tepla.
- **Ekologický způsob výroby** - jelikož se při použití kogeneračního způsobu výroby elektřiny a tepla ušetří asi 40% paliva, zatěžuje kogenerace z ekologického hlediska životní prostředí přibližně o stejné procento méně.
- **Energie pro případ nouze** - kogenerační jednotky slouží často i jako nouzové zdroje elektrické energie v místech její nepřetržité potřeby.

- **Výroba chladu** - pomocí absorpčního výměníku lze vyrobené teplo využít i k výrobě chladu pro technologické účely nebo klimatizaci. V takovém případě se pak jedná o tzv. trigeneraci (kombinovaná výroba elektrické energie, tepla a chladu).

1.2. Kogenerace pomocí plynových spalovacích motorů

Kogenerace pomocí plynových spalovacích motorů je dnes velmi rozšířená. Jako palivo se u plynových spalovacích motorů používá hlavně zemní plyn, bioplyn nebo důlní plyn (okrajově pak pyrolýzní plyn, dřevoplyn a koksárenský plyn). Vyrábí se ve výkonové řadě od cca 200 kW až do 5 MW. Tyto jednotky se instalují především tam, kde je zapotřebí menšího instalovaného výkonu, jedná se tedy například o nemocnice, hotely, malé průmyslové provozy apod.

Důležitou aplikací plynových spalovacích motorů jsou pak bioplynové stanice, kde se využívají nejčastěji motory o výkonu 250 až 1000 kW spalující bioplyn.

Kogenerační jednotky spalující bioplyn nebo důlní plyn mají od jednotek, které spalují zemní plyn určitá specifika, která jsou dána složením plynu (především podílem CH_4 v palivu) a také množstvím plynu za hodinu, jenž jsme schopni kogenerační jednotce zajistit.



Obr. 1.1. - kogenerační jednotka GE Jenbacher [1]

Nejen na území České republiky, ale i v mnoha jiných státech Evropy se používá zemní plyn typu H, který obsahuje 96 % metanu. Mimo metan tvoří zemní plyn vyšší uhlovodíky, CO_2 a N_2 . Obsah metanu v bioplynu se pohybuje v intervalu 60 – 70 % (další složky tvořící bioplyn jsou převážně CO_2 a v menším množství H_2 , H_2S a N_2). Obsah metanu v důlním plynu se pohybuje v rozmezí od 30 % do 70 % (mezi ostatní složky patří CO_2 , N_2 , popřípadě O_2 u činných dolů). Hranice únosnosti pro spalování bioplynu je obvykle 40 % podíl CH_4 a 60 % podíl CO_2 . Při spalování důlního plynu hranice podílu metanu nesmí klesnout pod 25 %. Důvodem je to, že při snižování obsahu metanu ve směsi se snižuje rychlost

laminárního plamene a nastávají problémy se zhasením motoru během provozu, což je nežádoucí jev, protože se tím snižuje i účinnost a životnost spalovacího motoru. Mezi další kritické faktory při provozu plynového spalovacího motoru patří:

- a. teplota plynu
- b. tlak plynu
- c. výkyvy tlaku
- d. vlhkost plynu
- e. spád potrubí

Teplota plynu před vstupem do kogenerační jednotky by neměla být vyšší než 40 °C. Je-li teplota vyšší, dochází k nadměrnému teplotnímu namáhání armatur a řídících jednotek. To vede nejčastěji k poškození membrán, a tím k jejím netěsnostem. Tlak plynu by se měl pohybovat v rozmezí cca 90 – 200 mbar a jeho výkyvy by neměly překročit hodnotu 10 mbar·s⁻¹. Výkyvy tlaku plynu jsou problematické především u plynu důlního.

Pokud relativní vlhkost plynu dosahuje více než 80 %, dochází k tvorbě vodních zátek. S tím souvisí spád potrubí, který se musí s ohledem na kondenzaci plynu volit co nejmenší, aby se zamezilo vodním zátkám, které se vytvářejí hlavně v prohlubních.

Hodnoty kritických faktorů se liší podle použitých materiálů a konstrukčního uspořádání, proto každý výrobce kogeneračních jednotek tyto kritické hodnoty uvádí trochu jiné.

1.3. Jak pracuje kogenerační jednotka

Elektrická energie vzniká v elektrárnách roztočením elektrického generátoru pomocí turbíny. Teplo nutné k výrobě páry, která pohání turbínu, se většinou získává spalováním uhlí nebo štěpením jader uranu. Velká část tepla není využita a je bez užitku vypouštěna do ovzduší. Účinnost výroby se v tepelných elektrárnách pohybuje kolem 30%, nejmodernější paroplynové elektrárny pak mají účinnost kolem 50%, ovšem k dalším ztrátám ve výši asi 11% dochází při transformaci a dálkovém přenosu elektrické energie.

V kogenerační jednotce vzniká elektrická energie obdobným způsobem jako v jiných elektrárnách - roztočením elektrického generátoru, a to pomocí pístového spalovacího motoru.

Teplo, které se ve spalovacím motoru uvolňuje, je prostřednictvím chlazení motoru, oleje a spalín efektivně využíváno. Účinnost kogeneračních jednotek se proto pohybuje v rozmezí 80 - 90 %, přičemž tepelná účinnost zařízení ku elektrické účinnosti bývá většinou v poměru 5:4. U některých typů spalovacích zařízení je však tento poměr i 1:1.

1.4. Výroba tepelné a elektrické energie

Tepelná energie, kterou lze dále použít pro vytápění budov nebo procesních zařízení (např. reaktor u bioplynových stanic), se tvoří za pomoci výměníků. Základním výměníkem u kogeneračních jednotek, které pracují na bázi spalovacích motorů, je především výměník motorového okruhu a spalínový výměník. Jako výměník motorového okruhu se většinou používá deskový výměník. V případě spalínového výměníku můžeme použít výměník trubkový, kde spaliny proudí uvnitř trubek a předávají tak svou tepelnou energii otopné vodě.

Elektrická energie se získává přeměnou mechanické energie, a to za pomoci elektromagnetické indukce v elektrickém generátoru, kde můžeme použít generátory synchronní i asynchronní.



Obr. 1.2. - kogenerační jednotka GE Jenbacher [1]

1.5. Využití CO₂ ze spalín

Zajímavou, ale ne příliš rozšířenou a známou aplikací je využití potenciálu emisí vznikajících při spalování plynu v kogeneračních jednotkách. Jedná se o CO₂, tedy o plyn, který rostliny využívají jako zdroj uhlíku při fotosyntéze.

Emise ze spalování plynu, jež obsahují vysoký podíl CO₂, jsou nejdříve pomocí katalytických reakcí vyčištěny a po odevzdání svojí tepelné energie ve spalínovém výměníku jsou vháněny pomocí dmyhadla do skleníku. Ve skleníku se tak zvýší podíl oxidu uhličitého v okolním vzduchu. Jakmile je horní mez obsahu oxidu uhličitého ve skleníku překročena, odvádí se spaliny pomocí řídicí jednotky a soustavy škrtecích ventilů do komína.

Objemový podíl oxidu uhličitého v atmosféře je zhruba 350 ppm, optimální hladina pro některé rostliny je však okolo 1500 ppm. Při použití této technologie je tedy obsah oxidu uhličitého ve skleníku několikanásobně vyšší oproti okolní atmosféře. Navíc tepelná energie odváděná z motorového okruhu a ze spalín je využita k vytápění skleníku, čímž se udržují konstantní podmínky pro zdárný růst rostlin po celý rok.

Tuto aplikaci využila v roce 2008 holandská firma zabývající se pěstováním rajčat. Použila kogenerační jednotku firmy Jenbacher spalující zemní plyn o výkonu 4 MW. Další aplikace pochází z města Dmitrov v Rusku vzdáleného od Moskvy cca 65 km. Na konci roku 2008 zde byly instalovány tři kogenerační jednotky spalující zemní plyn o celkovém výkonu 5,4 MW. Vyrobené teplo a oxid uhličitý pocházející ze spalin má zde napomoci ke zvýšení produkce květin. [1]

1.6. Bioplynová stanice

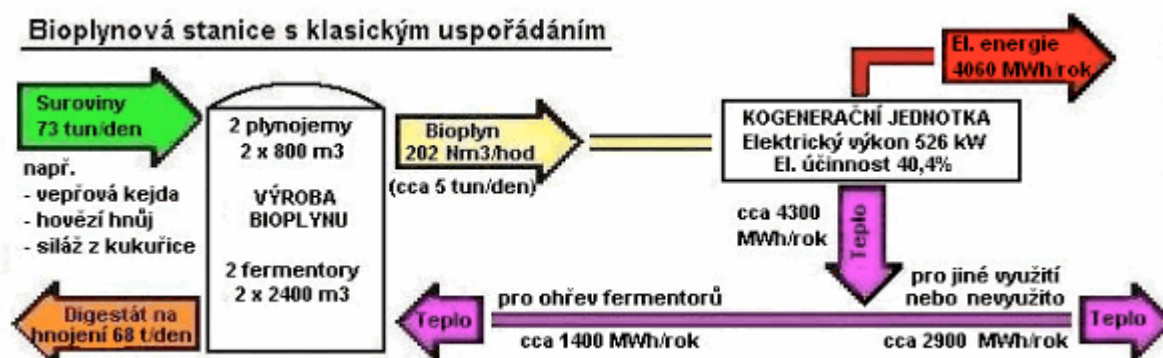
Bioplynové stanice s kogenerační jednotkou s vysokým elektrickým výkonem by mohly přispět k rychlejšímu rozvoji obnovitelné energetiky v ČR. Krom jiného se tyto stanice vyznačují vyšší ekonomickou efektivností.

Hlavní předností bioplynových stanic je poměrně malá spotřeba dostupných obnovitelných vstupních surovin. K výrobě bioplynu lze využít celou řadu biologicky rozložitelných odpadů. Rovněž využitelnost výstupních produktů (elektřiny, tepla, hnojivého digestátu a i samotného bioplynu) je obecně dobrá. Při současné technické úrovni zařízení a řídicí techniky je provoz bioplynových stanic navíc poměrně jednoduchý a i z tohoto důvodu může s úspěchem bioplynové stanice provozovat celá řada malých provozovatelů - jednotliví zemědělci, obce, čistírny odpadních vod, společnosti pro nakládání s odpady a další.

Na druhou stranu investiční náklady na výstavbu bioplynových stanic jsou poměrně vysoké. Doba návratnosti je v našich současných ekonomických podmínkách dlouhá, obvykle delší než 10 let.

1.6.1. Standardní řešení bioplynových stanic

Bioplynové stanice byly dosud dimenzovány obvykle na trvalý provoz s výkonem odpovídajícím výrobě bioplynu. Většinou se instalovaly dvě kogenerační jednotky, aby v případě výpadku byla zachována alespoň částečná dodávka elektrické energie a tepla pro bioplynový reaktor.

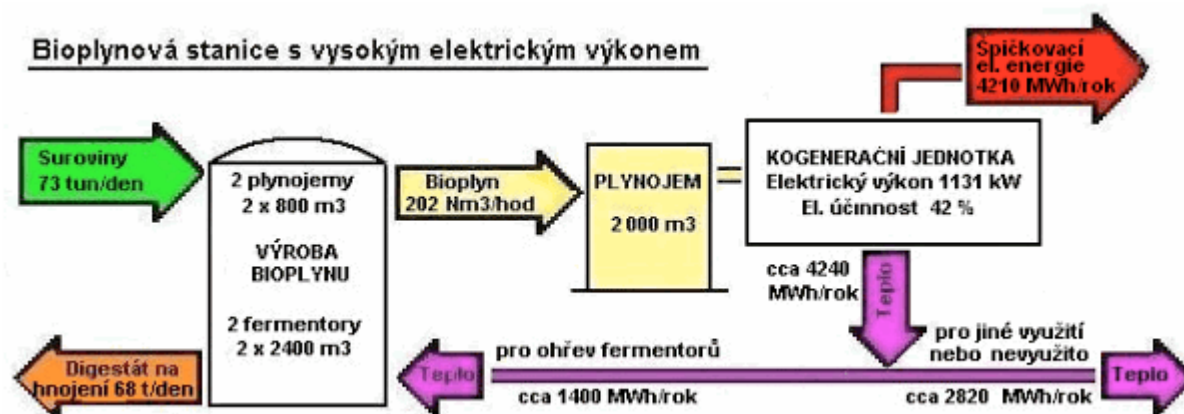


Obr. 1.3. - standardní uspořádání bioplynové stanice [2]

1.6.2. Bioplynová stanice s vysokým elektrickým výkonem

Změnou technického řešení a způsobu provozu kogenerační jednotky bioplynové stanice a navazujících zařízení lze dosáhnout kratší návratnosti investice celé bioplynové stanice. Změna spočívá především v instalaci kogenerační jednotky vyššího výkonu a změně dimenzování, případně doplnění dalších zařízení bioplynové stanice. Samotná část výroby bioplynu zůstává stejná, jako u obvyklé koncepce bioplynových stanic.

Kogenerační jednotka je dimenzována na 2x až 3x vyšší výkon, než by odpovídalo trvalému provozu pro denní produkci bioplynu. Na základě dohody s odběratelem elektrické energie je kogenerační jednotka provozována na nominální výkon, avšak pouze 8 až 12 hodin denně, v době vysoké spotřeby elektřiny. [obr.1.4]



Obr. 1.4. - bioplynová stanice s kogenerační jednotkou pro špičkový provoz 8 až 12 hodin denně.

Životnost motoru kogenerační jednotky je obvykle udávána v rozmezí 6 až 8 let trvalého provozu. Životnost však závisí na počtu startů. Proto se při provozu ve špičkách životnost prodlouží méně, než by odpovídalo celkovému počtu provozních hodin.

Aby mohla být větší kogenerační jednotka provozována v energetických špičkách, musí být instalován dostatečně velký plynomej pro jímání bioplynu v době odstávky kogenerační jednotky. Také příslušná potrubí bioplynu a další zařízení kogenerační jednotky

musí být dimenzována na větší průtoky bioplynu. K vyvedení výkonu musí být instalován větší transformátor a odpovídající elektrické vedení. Vhodné je také doplnit akumulátor tepla, aby bylo teplo k dispozici i v době odstávky kogenerační jednotky.

Takto dimenzované a provozované zařízení vyrobí ze stejného množství vstupních surovin, resp. ze stejného množství bioplynu, více elektřiny. Přitom špičkovou elektřinu je možno prodat za vyšší cenu.

1.7. Další možnosti využití kogeneračních jednotek na bioplyn

Významné uplatnění mají kogenerační jednotky při anaerobní stabilizaci odpadního kalu na čistírnách odpadních vod. Do čistíren odpadních vod bývá často přiváděn i zemní plyn, který je využíván jako záložní palivo v plynových kotlích pro nutný ohřev kalu v případě, že vlastní produkce bioplynu na dostatečný ohřev nepostačuje.

Moderní plynové kogenerační jednotky mohou spalovat podle potřeby jak bioplyn, tak zemní plyn. Mohou tedy být využívány v čistírnách odpadních vod jako zdroje elektrické energie pro dodávky elektřiny z bioplynu a nebo ke kombinované výrobě elektřiny a tepla ze zemního plynu. Současně mohou sloužit jako zdroj odpadního tepla pro termofilní stabilizaci a pro případné sušení stabilizovaného kalu před jeho použitím jako hnojiva (nebo před jeho spalováním).

S využitím kogeneračních jednotek na bioplyn a zemní plyn by prakticky všechny větší čistírny odpadních vod mohly svůj přebytečný kal takto využívat a upravovat ho termofilní anaerobní stabilizací na hygienicky nezávadné organické hnojivo a nebo na odvodněné a vysušené palivo (pokud by kal nebyl jako hnojivo použitelný).

2. Stanovení množství a parametrů využitelného odpadního tepla v bioplynové stanici v Želatovicích

Pro výrobu tepla a elektřiny z bioplynu byla zvolena kogenerační jednotka s elektrickým výkonem 999 kW.

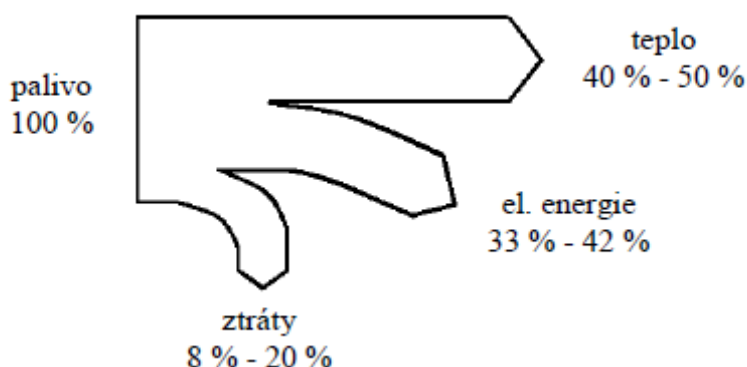
Kogenerační jednotka se skládá z:

- Plynového zážehového motoru
- Automatického trojfázového synchronního generátoru
- Katalyzátoru
- Využití odpadového tepla (systém kapalinového chlazení motoru, výměník tepla)
- Spalinového tlumiče hluku (65 dB v 10 m vzdálenosti)

Tento navržený typ kogenerace se spalovacím motorem má nejvýhodnější stupeň přeměny paliva na elektrickou energii. Transformace tepelné energie z paliva na energii mechanickou je zde zajištěna zážehovým motorem, který pohání elektrický generátor zajišťující výrobu elektrické energie.

Pro využití odpadního tepla z motoru je instalován tepelný výměník, který odvádí teplo z bloku motoru (80 až 90°C). V případě potřeby tepla pro další využití je možné instalovat spalínový kotel pro odvod tepla ze spalin (cca 400 až 500°C). Kogenerační jednotky jsou obvykle navrhovány na parametry běžného teplovodního otopného systému 90/70°C.

Následující obrázek [obr.2.1] naznačuje účinnosti dosahované u kogeneračních jednotek se spalovacím motorem. Spalovací motor byl zvolen z toho důvodu, že při snížení výkonu motoru nedochází k výrazné změně elektrické účinnosti.



Obr.2.1 - Sankeyův diagram toku energií pro kogenerační jednotku se spalovacím motorem

V ideálním případě může být kogenerační jednotka v chodu i více než 8 395 hodin v roce (až 23 hodin denně), a to v podstatě v nominálním výkonu. Tento ideální případ by nastal při precizním zvládnutí fermentačního procesu, dokonalém sladění produkce bioplynu ve fermentorech a plynulém režimu výroby elektřiny (odstávky pro pravidelnou údržbu motoru jsou jen v řádu několika hodin, havarijní odstávka motoru bývá výjimečná).

Pro výpočet potřeby tepla pro krytí tepelných ztrát fermentoru, vytápění objektů a ohřev vody byly použity klimatické údaje pro oblast Prostějov (235 m.n.m.), jejichž přehled uvádí tabulka [tab.2.1].

parametr	hodnota
lokalita Želatovice (226 m.n.m.)	226 m.n.m.
venkovní výpočtová teplota (Q_e)	-15,0 °C
průměrná venkovní teplota v otop. obd. (Q_{es})	4,0 °C
průměrná vnitřní teplota (Q_{is})	10 až 50 ¹⁾ °C
definovaná teplota pro zahájení vytápění	13,0 °C
počet dnů otopného období (d)	227 dnů
počet denostupňů normativních $D = d (Q_{is} - Q_{es})$	3 405 D°

1) dle typu objektu či zařízení

Tab.2.1 - Parametry prostředí

2.1. Potřeba tepla pro provoz BPS

Potřeba tepla na technologické procesy zahrnuje ohřev substrátu a krytí tepelných ztrát pláštěm fermentoru a předjímky. Pro tento výpočet je uvažováno množství vstupní hmoty 36 370 t·rok⁻¹ (obsah sušiny 18,9 %) ředěné na cca 10 % sušiny, která je ohřívána z průměrné vnější teploty (teplota substrátu uskladněného ve venkovních jímkách) v dané lokalitě (cca 8,3°C) na 40°C v mezofilní oblasti procesu fermentace.

Pro krytí tepelných ztrát fermentoru je uvažován součinitel prostupu tepla $k = 0,37 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. Další parametry a celkovou technologickou spotřebu tepla uvádí následující tabulka [tab.2.2.].

	plocha / hmotnost	rozdíl teplot	tep. ztráta	měr. tep. kapacita	potřeba tepla	potřeba tepla
	[m ² · t ⁻¹]	[°C]	[W · m ⁻²]	[kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	[MWh · rok ⁻¹]	[GJ · rok ⁻¹]
fermentor	2 593 m ²	42 až 45	15,4 až 16,7	-	376	1 355
substrát	36 370 tun	42	-	2,093-4,186	1 874	6 748
celkem					2 251	8 103

Tab. 2.2. - Spotřeba tepla na technologické procesy

2.2. Spotřeba tepla na vytápění a ohřev vody v přilehlých budovách

Využití tepla pro vytápění provozních objektů zemědělského areálu se přepokládá až v budoucnu. Z celkového vyrobeného tepla může tedy vlastní spotřeba, tj. využitelné teplo, činit na základě výpočtu zhruba 27 % tepla vyrobeného kogenerační jednotkou.

Přehled celkové spotřeby tepla uvádí následující tabulka [tab.2.3.].

spotřebič tepla	vlastní spotřeba tepla	využití vyrobeného
	(GJ·rok ⁻¹)	tepla (%)
Ohřev fermentorů	1355	4,5%
Dohřev substrátu na vstupu	6748	22,3%
Celkem technologie	8103	26,8%
Celkem ostatní (ÚT + TV)	0	0,0%
Celková spotřeba vyrobeného tepla	8103	26,8%

Tab.2.3. – Přehled celkové spotřeby vyrobeného tepla

2.3. Energetická bilance a technické ukazatele zdroje energie

Pro výpočet je uvažována celková roční doba provozu kogenerační jednotky (cca 8 300 hodin), což představuje potřebu bioplynu cca 3 617 tis. m³·rok⁻¹ pro provoz na jmenovitý výkon.

Navržená bioplynová stanice vyprodukuje zhruba 3 954 tis. m³ bioplynu za rok, což při výhřevnosti 19,8 MJ·m⁻³ odpovídá energii v palivu cca 78 447 GJ·rok⁻¹ při ročním zpracování zhruba 36 370 tun materiálu. Při provozu zdroje na jmenovitý výkon se spotřebuje 91 % vyprodukovaného bioplynu. Výpočet vychází z předpokládané produkce metanu, resp. jeho podílu v bioplynu min. 55 % (tzn. výhřevnosti bioplynu min. 19,8 MJ·m⁻³).

Vyrobený bioplyn bude využit pro provoz jedné kogenerační jednotky. Množství vyrobené elektřiny odpovídající předpokládané kvalitě bioplynu (resp. výtěžnosti metanu) a době provozu kogenerační jednotky bude cca 8 292 MWh·rok⁻¹.

Vstupy (množství bioplynu) pro kogenerační jednotky:

- produkce bioplynu za rok 3 954 tis. m³·rok⁻¹
- výhřevnost bioplynu 19,8 MJ·m⁻³

Základní technické údaje kogenerační jednotky uvádí následující přehled:

- typ plynového spalovacího motoru JMC 416 GS-B.L (výrobce GE Jenbacher, Rakousko)
- počet jednotek 1 ks
- spotřeba bioplynu při 1 500 ot. \cdot min⁻¹ 400 m³·h⁻¹
- **elektrický výkon kogenerační jednotky 999 kW**
- tepelný výkon kogenerační jednotky 1 015 kW
- **účinnost elektrická 41,6 %**
- účinnost tepelná 42,2 %
- účinnost celková 83,8 %

Jmenovité parametry kogenerační jednotky platí pro normální podmínky (60 % CH₄, 40 % CO₂, výhřevnost 5kWh·m⁻³).

Vyrobená elektřina bude dodávána do sítě E.ON Distribuce, a.s.

Prodejní cena elektrické energie do distribuční sítě je dána platným cenovým rozhodnutím ERÚ (nyní Cenové rozhodnutí č. 4/2009 ze dne 3. listopadu 2009). Pro výrobu elektřiny spalováním bioplynu v bioplynových stanicích kategorie AF1 (dle vyhlášky č. 482/2005 Sb., kterou se stanoví druhy, způsoby využití a parametry biomasy při podpoře výroby elektřiny z biomasy, ve znění pozdějších předpisů) činí tato cena 4 120 Kč·MWh⁻¹ v režimu výkupních cen (v režimu zelených bonusů by činila 3 150 Kč·MWh⁻¹), pro bioplynové stanice v kategorii AF2 činí tato cena 3 550 Kč·MWh⁻¹ v režimu výkupních cen (v režimu zelených bonusů by činila 2 580 Kč·MWh⁻¹). Následující tabulka [tab. 2.4.] shrnuje bilanci tepla a elektrické energie a základní technické ukazatele navrženého zdroje. Prodejní cena elektřiny je uvažována v režimu výkupních cen v kategorii AF1.

ukazatel	jednotka	hodnota
Instalovaný elektrický výkon celkem	MW	0,999
Instalovaný tepelný výkon celkem	MW	1,015
Dosažitelný elektrický výkon celkem	MW	0,999
Pohotový elektrický výkon celkem	MW	0,999
Výroba elektřiny	MWh·rok ⁻¹	8292
Prodej elektřiny	MWh·rok ⁻¹	8001
Vlastní spotřeba elektřiny na výrobu elektř.	MWh·rok ⁻¹	290
Spotřeba tepla v palivu na výrobu elektřiny	GJ·rok ⁻¹	35621
Výroba dodávkového tepla	GJ·rok ⁻¹	30281
Prodej tepla	GJ·rok ⁻¹	0
Spotřeba tepla v palivu na výrobu tepla	GJ·rok ⁻¹	36134
Spotřeba tepla v palivu (celková)	GJ·rok ⁻¹	71755

Tab. 2.4. - Bilance výroby energie z vlastních zdrojů

V následujících tabulkách [Tab 2.5. a Tab.2.6.] jsou shrnuty energetické bilance posuzované varianty.

ukazatel	GJ·rok ⁻¹	tis. Kč·rok ⁻¹
Vstupy paliv a energie	79 492	9 032
z toho bioplyn	78 447	9 032
z toho el. energie	1 045	0
Změna zásob paliv a energie	0	0
Spotřeba paliv a energie	79 492	9 032
Prodej energie	28 805	32 966
Konečná spotřeba paliv a energie v objektu	50 687	-23 934
Ztráty ve vlastním zdroji a rozvodech	34 886	1 463
Spotřeba energie na vytápění a TUV	0	0
Spotřeba energie na tech. a ostatní procesy	9 148	0

Tab. 2.5. - Energetická bilance

název ukazatele	jednotka	hodnota
Roční energetická účinnost zdroje	%	83,8%
Roční energetická účinnost výroby elektrické energie	%	41,6%
Roční energetická účinnost výroby tepla	%	42,2%
Specif. spotřeba tepla v palivu na výrobu el.	GJ·MWh ⁻¹	4,30
Specif. spotřeba tepla v palivu na výrobu dodáv. tepla	GJ·GJ ⁻¹	1,19
Roční využití instalovaného elektrického výkonu	h·rok ⁻¹	8 300
Roční využití dosažitelného elektrického výkonu	h·rok ⁻¹	8 300
Roční využití pohotového elektrického výkonu	h·rok ⁻¹	8 300
Roční využití instalovaného tepelného výkonu	h·rok ⁻¹	8 287

Tab.2.6. - Základní technické ukazatele energetického zdroje

Z výše uvedeného vyplývá, že roční produkce energie ze zdroje činí cca 29 850 GJ·rok⁻¹ elektrické energie a cca 30 281 GJ·rok⁻¹ tepla, z toho cca 27 % vyrobeného tepla se spotřebuje na technologický ohřev, zbývajících teplo zatím bude mařeno v chladiči a využito v budoucnu. Vlastní spotřeba elektřiny činí zhruba 290,2 MWh·rok⁻¹ (cca 3,5 % z vyrobeného množství el. energie).

Minimální účinnost výroby energie v kogenerační jednotce s pístovým motorem (pro daný jmenovitý elektrický výkon a teplotu topné vody na výstupu z kogenerační jednotky) má být dle vyhlášky č. 150/2001 Sb. $\eta = 80 \%$, přičemž měrná spotřeba energie v palivu na výrobu elektřiny $S_{ev\text{ pal}}$ menší než 4,5 GJ·MWh⁻¹. Dle podkladů výrobce jsou oba požadavky splněny.

3. Možnosti využití odpadního tepla

3.1. Sušení odpadním teplem z bioplynové stanice

Jednou z možností využití odpadního tepla z bioplynové stanice je například sušení kukuřice, pšenice, dřevní štěpky či digestátu.

Na sušení digestátu se běžně používají pásové sušárny. Ty jsou konstruovány pro různé výkony bioplynových stanic. Tyto sušárny pracují jako nízkoteplotní (80-120°C) a jsou navrhované dle zpracovávaného produktu. Regulaci sušení lze provádět rychlostí pohybu pásu.

Pro menší velikosti bioplynových stanic do 500 kW (což není tento případ) lze také doporučit žlabové sušičky, které fungují na principu pevného sušicího roštu s krabíčkovým mechanismem zajišťujícím pohyb materiálu po roštu. Na těchto sušičkách je možné sušit různé zemědělské produkty a také dřevní štěpku, nelze ale sušit digestát z bioplynových stanic.

Obvykle se požaduje konečná vlhkost v rozmezí 10 – 15% (konečná sušina v rozmezí 90 – 85%; 88 % je výhodou pro stabilizaci na skladování a také aby se materiál zbytečně nepřesoušel, při využití pro lisování pelet či briket je nejvhodnější podíl sušiny 85%).

Mezi rozhodující ukazatele pro sušení patří počáteční podíl vlhkosti w_1 , což je podíl vlhkosti materiálu před zpracováním v sušičce. Konečný podíl vlhkosti w_2 je pak podíl vlhkosti materiálu po zpracování v sušičce, w_0 je podíl vlhkosti vysušený v sušičce. Důležitým ukazatelem je také podíl sušiny s (1) – analogicky označíme počáteční a koncový podíl sušiny s_1 a s_2 .

Stanovení sušiny:

$$s = 100 - w [\%] \quad (1)$$

kde:

w – podíl vlhkosti v materiálu [%]

Pro zjednodušení se v běžné praxi zavádí bezrozměrná veličiny měrný odsušek o .

Měrný odsušek vztažený na jednotkové množství vlhkého materiálu:

$$o_1 = \frac{w_0}{w_1} [kg] \quad (2)$$

kde:

w_0 - podíl vlhkosti vysušený v sušičce [%]

w_1 – počáteční podíl vlhkosti materiálu [%]

Měrný odsušek vztažený na jednotkové množství usušeného materiálu:

$$o_2 = \frac{w_0}{w_2} [kg] \quad (3)$$

kde:

w_0 - podíl vlhkosti vysušený v sušičce [%]

w_2 – konečný podíl vlhkosti materiálu [%]

Měrný odsušek o_1 udává, kolik kilogramů vlhkosti (vody) je potřeba vysušit z 1kg vlhkého materiálu, zatímco o_2 udává, kolik kilogramů vlhkosti (vody) je třeba vysušit, abychom získali 1kg úsušku. Dosazením z předešlých rovnic se odvodí zjednodušené vztahy pro měrný odsušek:

$$o_1 = 1 - \frac{s_1}{s_2} [kg] \quad (4)$$

$$o_2 = \frac{s_2}{s_1} - 1 [kg] \quad (5)$$

Pomocí těchto veličin můžeme snadno analyzovat vliv počáteční i konečné vlhkosti (sušiny) na potřebné množství vysušené vody bez ohledu na konkrétní výkonnost sušárny.

3.1.1. Výpočet sušení digestátu pro použití u bioplynové stanice v Želátovicích

Stanovení využitelného tepla z kogenerační jednotky:

- instalovaný tepelný výkon celkem: 1,015 MW
- roční celková výroba tepla:

$$Q_C = 1,015 \cdot 23 \cdot 365 \cdot 3600 = \underline{\underline{30675330 [MJ \cdot rok^{-1}]}} \quad (6)$$

- spotřeba tepla pro technologii: $8.103.000 \text{ MJ} \cdot \text{rok}^{-1}$
- množství tepla využitelného pro sušení:

$$Q_V = 30.675.330 - 8.103.000 = \underline{\underline{22572330 [MJ \cdot rok^{-1}]}} \quad (7)$$

Počáteční vlastnosti digestátu:

$$s_1 = 27,93\%$$

$$w_1 = 72,07\%$$

Požadované parametry digestátu:

$$s_2 = 85\%$$

$$w_2 = 15\%$$

Pro zadané parametry bude výpočet vypadat následovně:

1) výpočet měrného odsušku

$$o_1 = 1 - \frac{s_1}{s_2} = 1 - \frac{27,93}{85} = \underline{\underline{0,67 [kg]}} \quad (8)$$

Z výpočtu vyplývá, že z 1kg vlhkého materiálu je třeba vysušit 0,67 kg vody.

$$o_2 = \frac{s_2}{s_1} - 1 = \frac{85}{27,93} - 1 = \underline{\underline{2,04 [kg]}} \quad (9)$$

Z tohoto výpočtu vyplývá, že pro získání 1kg úsušku je třeba vysušit 2,04kg vody.

2) výpočet potřeby tepla

Pro vysušení použijeme sušárnu Stela s měrnou spotřebou tepla na 1kg odpařené vody $5\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

a) na 1 kg vlhkého materiálu

$$Q_1 = o_1 \cdot 5 = 0,67 \cdot 5 = \underline{\underline{3,35 [MJ \cdot kg^{-1}]}} \quad (10)$$

b) na 1 kg suchého materiálu

$$Q_2 = o_2 \cdot 5 = 2,04 \cdot 5 = \underline{\underline{10,2 [MJ \cdot kg^{-1}]}} \quad (11)$$

3) stanovení množství digestátu

- množství vlhkého digestátu

$$m_1 = \frac{Q_v}{Q_1} = \frac{22.572.330}{3,35} = \underline{\underline{6738 [t \cdot rok^{-1}]}} \quad (12)$$

- množství suchého digestátu

$$m_2 = \frac{Q_v}{Q_2} = \frac{22.572.330}{10,2} = \underline{\underline{2213 [t \cdot rok^{-1}]}} \quad (13)$$

Z výpočtů vyplývá, že jsme schopni ročně vysušit 6738 tun digestátu o vlhkosti 72,07 % za vzniku 2213 tun suchého digestátu o vlhkosti 15%.

V následující tabulce [tab 3.1. – typy sušiček] je uveden přehled sušiček od firmy Pawlica, s.r.o. – jsou zde uvedeny jak typy pro výkon 500kW, které lze na danou aplikaci bez

problému použít i typy o výkonu 1000kW. V tom případě by musel být vlastní ohřev technologického celku řešen z jiného zdroje než z bioplynové stanice (např. externí plynový kotel).

Typ sušičky	Výkon	Výkonnost	Při sušení	Materiál
PBT 2-2200-9	500 kW	450 kg·h ⁻¹	ze 75% na 20%	digestát
PBT 2-2200-18	1000 kW	900 kg·h ⁻¹	ze 75% na 20%	digestát
HS10	500 kW	2,5 m ³ ·h ⁻¹	z 50% na 20%	dřevní štěpka
HS50	1000 kW	5 m ³ ·h ⁻¹	z 50% na 20%	dřevní štěpka
HS10	500 kW	1 t·h ⁻¹	z 35% na 15%	kukuřice
HS10	500 kW	3,4 t·h ⁻¹	z 19% na 15%	pšenice
HS50	1000 kW	2 t·h ⁻¹	z 35% na 15%	kukuřice
HS50	1000 kW	7,8 t·h ⁻¹	z 19% na 15%	pšenice

tab 3.1. – typy sušiček

3.1.2. Alternativní využití sušení

Další možností využití tepla je sušení biomasy (kůry a dřevní štěpky) pro spalování v kotli na biomasu. V našem případě sice kogenerační jednotka nemůže spalovat biomasu, ale odpadní teplo může být využito pro její sušení například pro účely jiných zařízení.

Sušení biomasy je výhodné především z toho důvodu, že při spalování biomasy s vysokým obsahem vody dochází k velkému uvolňování vodních par, které ochlazují kotlové těleso a tím zhoršují podmínky pro funkční spalování. Zkondenzovaná pára reaguje s uhlíkatými složkami, což má negativní vliv na efektivní tepelnou výměnu jednotlivých teplosměnných ploch, dále pak snižuje tepelný výkon kotle, jeho účinnost a také může ochladit kotlové těleso až do té fáze, že se proces hoření zcela zastaví.

V samotném procesu sušení se snižuje podíl vlhkosti v palivu za pomoci přívodu tepla, vlhkost je pak odstraňována vlivem vypařování nebo sublimací. Mezi základní výhody poklesu vlhkosti v palivu patří zvyšování kalorické hodnoty paliva, lepší vzněcování, snazší hoření, menší množství spalin, nižší nároky kladené na spalinový systém a výrazně zmenšené komínové ztráty.

3.2. Využití CO₂ ze spalin pro urychlení růstu rostlin

Druhou možností využití tepla z bioplynové stanice je vytápění skleníku pro pěstování rostlin, přičemž je vhodné zároveň využít i CO₂.

Obvyklý obsah CO₂ ve vzduchu je 340 ppm (0,03 %). Pokud tento obsah klesá, růst rostlin se zpomaluje a při hodnotě 100 ppm se může úplně zastavit. Naopak pokud hodnota CO₂ ve vzduchu dosáhne hodnoty 1500ppm, intenzita fotosyntézy se může urychlit 2 až 3krát (i zde ale existuje horní mez, kdy dochází k porušení rostlinné buňky). Optimální hodnota koncentrace leží v rozmezí 1000 – 2000 ppm, závisí na klimatických faktorech, na době obohacení vzduchu oxidem uhličitým a také na druhu rostliny.

Při provozu skleníku musíme sledovat 4 základní faktory: teplotu (27°C), světlo (50000 lm·m²), vlhkost (65%) a CO₂ (0,1÷0,12%), přičemž první tři faktory jsou snadno sledovatelné i regulovatelné. Poslední faktor je limitující pro využití fotosyntézy, která je charakterizována absorpcí oxidu uhličitého, uvolňováním kyslíku a vytvářením všech molekul nutných pro růst a vývoj rostliny.

Výměna plyných látek (CO₂ a O₂) mezi rostlinou a vnějším prostředím probíhá přes mikroskopické otvory v epidermatu rostlin (stóma). Jejich prostřednictvím rostliny dýchají. Otevření těchto mikroskopických otvorů se v rozmezí koncentrací CO₂ od 0 do 400 ppm mění pouze velmi málo. Podle nárůstu koncentrace CO₂ se stómata pomalu zavírají. Při hodnotě 600 ppm je hodnota transpirace rostlin pouze 80 % hodnoty změřené při hodnotě 300 ppm. CO₂ tedy umožňuje rostlinám lépe udržovat vodu a lépe odolávat nepříznivým podmínkám růstu.

3.2.1. Stanovení množství CO₂ ve spalínách

Pro stanovení CO₂ ve spalínách bylo na základě Energetického auditu bude bioplyn obsahovat minimálně 55% metanu. Na základě této informace bylo vhodně zvoleno složení bioplynu.

Složení bioplynu:

CH ₄	55%
CO ₂	35,5%
H ₂ O	5%
N ₂	2,5%
O ₂	1%
H ₂	0,5%
H ₂ S	0,5%

Přebytek vzduchu pro spalování byl zvolen $n = 1,055$, součinitel zvětšení objemu vlivem vlhkosti vzduchu byl zvolen $v = 1,03$.

Spalovací rovnice



Teoretické množství kyslíku pro spalování

$$\begin{aligned} V_{O_2,t} &= 0,5 \cdot H_2 + 1,5 \cdot H_2S + 2 \cdot CH_4 - O_2 \\ V_{O_2,t} &= 0,5 \cdot 0,005 + 1,5 \cdot 0,005 + 2 \cdot 0,55 - 0,001 \\ \underline{\underline{V_{O_2,t} &= 1,109 [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]}} \end{aligned} \quad (17)$$

Teoretické množství suchého vzduchu

$$\begin{aligned} V_{VZ,t}^S &= \frac{V_{O_2,t}}{0,21} \\ V_{VZ,t}^S &= \frac{1,109}{0,21} \\ \underline{\underline{V_{VZ,t}^S &= 5,28 [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]}} \end{aligned} \quad (18)$$

Skutečné množství suchého vzduchu

$$\begin{aligned} V_{VZ,SK}^S &= V_{VZ,t}^S \cdot n \\ V_{VZ,SK}^S &= 5,28 \cdot 1,055 \\ \underline{\underline{V_{VZ,SK}^S &= 5,57 [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]}} \end{aligned} \quad (19)$$

Množství teoretických suchých spalin

$$\begin{aligned} V_{SP,t}^S &= V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + 0,79 \cdot V_{VZ,t}^S \\ V_{SP,t}^S &= 0,905 + 0,005 + 0,0025 + 0,79 \cdot 5,28 \\ \underline{\underline{V_{SP,t}^S &= 5,08 [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]}} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} V_{CO_2} &= CO_2 + CH_4 & V_{SO_2} &= H_2S & V_{N_2} &= N_2 \\ V_{CO_2} &= 0,355 + 0,55 & V_{SO_2} &= 0,005 [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] & \underline{\underline{V_{N_2} &= 0,0025 [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]}} \\ \underline{\underline{V_{CO_2} &= 0,905 [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]}} & & & & \end{aligned} \quad (21-23)$$

Množství skutečných suchých spalin

$$\begin{aligned}V_{SP,SK}^S &= V_{SP,t}^S + (n-1) \cdot V_{VZ,t}^S \\V_{SP,SK}^S &= 5,08 + (1,055 - 1) \cdot 5,28 \\V_{SP,SK}^S &= 5,37 [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]\end{aligned}\tag{24}$$

Množství skutečných vlhkých spalin

$$\begin{aligned}V_{SP,SK}^V &= V_{SP,SK}^S + V_{H_2O} \\V_{SP,SK}^V &= 5,37 + 1,28 \\V_{SP,SK}^V &= 6,65 [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]\end{aligned}\tag{25}$$

$$\begin{aligned}V_{H_2O} &= H_2 + 2 \cdot CH_4 + H_2S + (v-1) \cdot V_{VZ,SK}^S \\V_{H_2O} &= 0,005 + 2 \cdot 0,55 + 0,005 + (1,03 - 1) \cdot 5,57 \\V_{H_2O} &= 1,28 [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]\end{aligned}\tag{26}$$

Pokud uvážíme, že objem skutečných vlhkých spalin je $6,65m_N^3$ a množství CO_2 ve spalinách je $0,905 m_N^3$, pak nám vyjde, že spaliny obsahují 13,61% CO_2 .

3.2.2. Návrh skleníku pro pěstování rostlin

Skleník pro pěstování rostlin za pomoci CO_2 je navržen z komůrkového polykarbonátu (PC) o tloušťce 6mm. Výhodou tohoto materiálu je vysoká odolnost proti rozbití a dobré izolační vlastnosti ($k = 3,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$).

Rozměry skleníku:

Výška skleníku	$v = 2\text{m}$
Šířka skleníku	$\check{s} = 15\text{m}$
Délka skleníku	$l = 100\text{m}$

$$\begin{aligned}S_s &= \check{s} \cdot l \\S_s &= 15 \cdot 100 \\S_s &= 1500 [m^2]\end{aligned}\tag{27}$$

$$\begin{aligned}V_s &= S_s \cdot v \\V_s &= 1500 \cdot 2 \\V_s &= 3000 [m^3]\end{aligned}\tag{28}$$

Tepelná ztráta 1m² komůrkového polykarbonátu

$$Q_{SPC} = k_{PC} \cdot (t_1 - t_2)$$

$$Q_{SPC} = 3,7 \cdot (27 + 15)$$

$$\underline{\underline{Q_{SPC} = 155,4 [W \cdot m^{-2}]}}$$

(29)

kde:

k_{PC} součinitel prostupu tepla přes komůrkový polykarbonát

t_1 teplota uvnitř skleníku

t_2 venkovní výpočtová teplota

Celková tepelná ztráta skleníku

$$Q_{SC} = Q_s \cdot (2 \cdot \check{s} \cdot \nu + 2 \cdot l \cdot \nu + \check{s} \cdot l)$$

$$Q_{SC} = 155,4 \cdot (2 \cdot 15 \cdot 2 + 2 \cdot 100 \cdot 2 + 15 \cdot 100) \quad (30)$$

$$\underline{\underline{Q_{SC} = 304 [kW]}}$$

Vzhledem k tepelné ztrátě skleníku 304 kW navrhují 3 stejné skleníky o výše popsaných rozměrech a parametrech.

V případě tohoto řešení bude spotřeba tepla na vytápění skleníků 912kW, což je více tepla, než máme k dispozici (k dispozici je 73% tepla, což je 740kW). Proto bude třeba pro vytápění skleníků nebo pro dohřev technologie zajistit dodatečný zdroj tepla o výkonu 172kW.

3.2.3. Množství spalin pro dosažení ideální koncentrace CO₂

Ideální dávkování CO₂ je mezi c_{CO_2} 0,1 ÷ 0,12%, maximální koncentrace pak nesmí překročit $c_{CO_2} = 0,2\%$ (došlo by k uzavření pórů rostlin a růst by se zpomalil).

Vzhledem k tomu, že ve spalinách je 13,61% CO₂, musíme do skleníku přivést 100x menší objem spalin, než je objem skleníku:

$$\begin{aligned}
 V_{SP,ideal} &= \frac{V_s}{100} \\
 V_{SP,ideal} &= \frac{3000}{100} \\
 V_{SP,ideal} &= 30 [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \\
 (31)
 \end{aligned}$$

Výpočet doby plnění skleníku pro dosažení ideální koncentrace

$$\begin{aligned}
 t_P &= \frac{V_{SP,ideal}}{V_{SC}} \\
 t_P &= \frac{30}{0,125} \\
 t_P &= 240 [s] = 4 [\text{min}]
 \end{aligned} \tag{32}$$

kde:

V_{SC} objem spalín vyprodukovaných bioplynovou stanicí

$$V_{SC} = 450 \text{ m}_N^3 \cdot \text{hod}^{-1} = 0,125 \text{ m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

3.2.4. Vytápění skleníku

Pro vytápění skleníku můžeme použít teplo, které kogenerační jednotka produkuje. Zároveň ale budeme mít ve skleníku tepelné zisky ze spalín, které do skleníku přivedeme.

Vzhledem k tomu, že požadovaná teplota ve skleníku je 27°C, je potřeba ochladit spaliny na tuto teplotu. Ochlazením spalín získáme teplo, které můžeme využít např. pro vytápění skleníku.

Množství tepla získaného ochlazením spalín na teplotu 27°C

$$\begin{aligned}
 Q_{s,o} &= \rho \cdot V \cdot c \cdot (t_s - t_i) \\
 Q_{s,o} &= 1,33 \cdot 1 \cdot 1,5 \cdot (450 - 27) \\
 Q_{s,o} &= 843 [W \cdot m^{-3}]
 \end{aligned} \tag{33}$$

kde:

ρ hustota vlhkých spalín $\rho = 1,33 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

c měrná tepelná kapacita vlhkých spalín $c = 1,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Množství tepla přivedeného do skleníku spalínami

$$\begin{aligned}Q_{SP,27} &= \rho \cdot V \cdot c \cdot t_{ideal} \\Q_{SP,27} &= 1,33 \cdot 1 \cdot 1,5 \cdot 27 \\Q_{SP,27} &= 54 [W \cdot m^3]\end{aligned}\tag{34}$$

kde:

t_{ideal} ideální teplota ve skleníku $t_{ideal} = 27^\circ\text{C}$

Množství tepla, které musíme dodat pro vytopení skleníku

$$\begin{aligned}Q_{S,E} &= Q_{SC} - Q_{SO} - Q_{SP,27} \\Q_{S,E} &= 304000 - 843 - 54 \\Q_{S,E} &= 303103 [W]\end{aligned}\tag{35}$$

Pro vytopení 3 skleníku budeme tedy potřebovat 909,309 kW.

3.2.5. Bezpečnostní opatření ve skleníku

Ve vysokých koncentracích způsobuje CO_2 ztrátu vědomí a následnou smrt udušením. Proto musí být skleník před vstupem osob důkladně odvětrán nebo musí osoby vždy vstupovat s dýchacím přístrojem. Zároveň je nutné, aby bylo možné v případě nutnosti skleník co nejrychleji odvětrat – ideálně do 30s.

Pro sledování koncentrace CO_2 bude ve skleníku nainstalována měřicí stanice, která bude zároveň automaticky udržovat koncentraci CO_2 v rozmezí $0,1 \div 0,17\%$ a v případě poklesu pod tuto hranici začne automaticky dávkovat do skleníku spaliny.

3.3. Organický Rankinův cyklus

Další možností využití tepla je výroba elektrické energie ze spalin pomocí organického Rankinova cyklu. K tomuto účelu se vyrábí kompaktní ORC jednotky, které stačí připojit ke spalinovému traktu. I zde je vyprodukováno odpadní teplo, které může být použito například v předešlých dvou aplikacích.

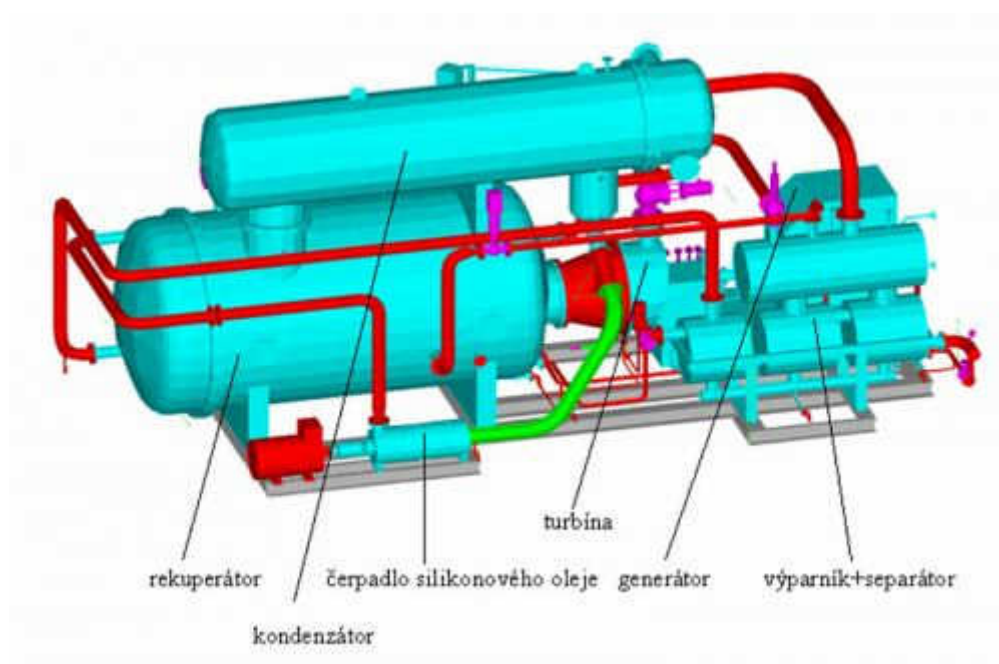
Organický Rankinův cyklus (ORC) je parní cyklus, podobně jako v případě parní turbíny, ve kterém se ale jako pracovní látka využívají organické sloučeniny. Důvodem využívání organických látek je hlavně to, že mají vyšší molekulovou hmotnost než voda a vydrží v kapalně podobě i při nižších teplotách a tlacích. Organický Rankinův cyklus využívá dvě látky, termo-olej a organickou pracovní sloučeninu. Podstatnou výhodou ORC oproti klasickým parním turbínám je jeho účinnost, kterou má ORC stejně vysokou i při nízkých výkonech.

Spaliny vzniklé hořením bioplynu proudí z kogenerační jednotky do speciálního dvoudílného výměníku. Zde předávají fyzické teplo oleji, který cirkuluje ve vloženém okruhu a představuje tepelný zdroj vlastního okruhu ORC. Teplo je v tandemu výměníků předáváno pracovní látce, která se ohřívá a odpařuje. Je generována sytá pára, která je vedena do axiální turbíny, kde expanduje na výstupní tlak do oblasti přehřáté páry. Výstupní příruba turbíny je přímo spojena s rekuperátorem. Ten předává fyzické teplo odebrané přehřáté páře na stranu kapalně fáze (systém s vnitřní rekuperací). Tímto opatřením se zvyšuje stupeň konverze tepelné energie na elektrickou. Následuje kondenzátor ve kterém dochází k fázové změně pracovního média z plynné na kapalnou fázi. Získané teplo je vodním okruhem odváděno a využíváno k vytápění.

Výhody systému ORC

- nízké provozní tlaky, proces ORC je uzavřený a plně automatický
- bezobslužný provoz, plných 79 % přivedeného tepla v termo-oleji může být využito na vytápění a 18 % převedeno na el. energii (čistý výstup na svorkách), pouze 3% jsou ztráty.
- vysoká účinnost, na rozdíl od páry má termo-olej schopnost přenést potřebnou teplotu 300°C bez nutnosti významnějšího zvýšení tlaku, což má význam pro bezpečnost provozu a umožňuje provoz bez trvalé obsluhy
- minimální údržba, použití média, které se odpařuje již při nižší teplotě umožňuje použití pomaloběžné turbíny se zachováním vysoké účinnosti i při dílčích zátěžích. Proto lze turbínu provozovat v různých režimech podle potřeb vytápění v rozmezí 10 až 100%
- plně automatický systém bez nutnosti regulačních zásahů umožňuje provoz bez stálé přítomnosti vysoce kvalifikované obsluhy

- plná uzavřenost systému (bezztrátová z hlediska médií) vyžaduje pouze minimální údržbu. Výše uvedené výhody se při srovnávání s parní kogenerací promítnou do výrazně nižších provozních nákladů s menší spotřebou paliva a větším množstvím vyrobené el.energie. Efektivní výroba je totiž možná i při dílčích zátěžích. Menší náklady jsou také na obslužné pracovníky a na údržbu. Bezztrátový cyklus používaných médií nepotřebuje žádné kondenzátní, dochlazovací a napájecí hospodářství. [5]



Obr 3.3 – jednotka ORC [4]

4. Ekonomické a environmentální porovnání

Pokud zanedbáme vstupní investice do nákupu a výstavby technologií (výstavba skleníků, nákup sušičky, nákup ORC jednotky), pak nám vychází jako nejvýhodnější aplikace:

1. Sušení dřeva nebo digestátu.
2. Využití tepla a CO₂ ze spalín pro skleníky.
3. ORC jednotka.
4. Sušení obilí a kukuřice

Sušení dřeva či digestátu je nejvýhodnější, protože je možné ho provozovat celý rok a lze tedy po celou dobu provozu jednotky odebírat vyprodukované teplo. Jelikož firma vlastní lesy, je možné sušit vlastní dřevo.

V případě druhé možnosti nevyužíváme pouze teplo, ale navíc i CO₂. Nevýhodou je to, že skleníky nevytápíme celoročně – přes léto zůstane teplo nevyužité.

Výhodou ORC jednotky je zisk další elektrické energie a tepla, ale pro získané teplo je třeba najít další uplatnění.

Sušení obilí a kukuřice umožní zpracování vypěstovaných produktů, ale daná aplikace zajistí odběr tepla jen po dobu 3-4 měsíců.

Vzhledem k výše zmíněným nevýhodám je třeba zvážit kombinace těchto technologií tak, aby byly maximálně využity zdroje po celý rok:

1. ORC jednotka při současném využití tepla pro sušičku dřeva nebo digestátu
2. ORC jednotka při současném využití CO₂ pro skleníky a tepla pro vytápění skleníků

Kombinace těchto technologií zajišťuje maximální využití tepla pro celý rok.

Závěr

Bakalářská práce se zabývá možnostmi využití odpadního tepla z bioplynové stanice v obci Želatovice.

V práci byly navrženy tři možnosti řešení využití tepla. Jako první možnost byla zvolena sušička na sušení dřeva, digestátu, obilí a kukuřice. Pro druhou možnost bylo zvoleno méně známé využití tepla a CO₂ ze spalín pro skleníky na pěstování rostlin, přičemž se úroda při zachování ideálních podmínek může zvětšit až na trojnásobek. Třetí možností pak byla instalace ORC jednotky ke spalínovému traktu. Tímto způsobem získáme další elektrickou energii k prodeji a také další odpadní teplo, které lze využít pro jednu z dříve navrhovaných možností.

V závěru práce jsou jednotlivé možnosti ekonomicky a environmentálně zhodnoceny a je doporučena kombinace technologií, která zajišťuje využití tepla po celý rok.

Použitá literatura

- [1] TRÁVNÍČEK, P., KARAFIÁT, Z.: Kogenerace pomocí plynových spalovacích motorů. Dostupné z WWW: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/kogenerace-pomoci-plynovych-spalovacich-motoru>
- [2] BECHNÍK, B., BLÁHA, P.: Bioplynová stanice s kogenerační jednotkou pro dodávky elektřiny ve špičkách. Dostupné z WWW <http://www.pxe.cz/Produkty/>
- [3] Porsenna o.p.s.: Energetický audit – bioplynová stanice Želatovice. 2010
- [4] <http://ekobioenergo.cz/>
- [5] <http://www.kez.tul.cz/>
- [6] DIDUŠKOVÁ, M., VOTÁPEK, M. Jak investovat do úspor a šetřit vlastní kapitál. Energy Performance Contracting. Praha, 1995.
- [7] <http://www.lanitgarden.cz/>
- [8] <http://www.energie21.cz/>
- [9] <http://www.tzb-info.cz/>